

**ANÁLISIS DE MATERIAL EN POLVO PARA ASIENTOS DE VÁLVULAS EN
MOTORES DIESEL**

ANDRES FELIPE SAAVEDRA CALAMBÁS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014**

**ANÁLISIS DE MATERIAL EN POLVO PARA ASIENTOS DE VÁLVULAS EN
MOTORES DIESEL**

ANDRES FELIPE SAAVEDRA CALAMBÁS

Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Mecánico

**Directora Académica
NELLY CECILIA ALBA DE SÁNCHEZ, PhD.
Ingeniera Mecánica**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecánico.

JULIAN ARNALDO AVILA DIAZ

Jurado

MAURICIO BARRERA

Jurado

Santiago de Cali, 13 de Enero de 2014

Este trabajo se lo dedico a la memoria de mi madre Amparo Calambás y a mi padre Saúl Saavedra, ya que a pesar de las adversidades que tuve en mi vida universitaria siempre creyeron en mí, brindándome todo su apoyo emocional y amor, además, de haberme enseñado a ser una persona con buenos valores.

A mis hermanas Angélica María Saavedra y María Claudia Saavedra.

A mi tía Myriam Saavedra, quien también me ha apoyado durante toda mi vida y carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Les agradezco de todo corazón a esas personas que además de creer en mí, hicieron posible la realización de este proyecto, tales como: la Dra. Nelly Cecilia Alba de Sánchez, quien además de ser la directora de mi proyecto, me acogió en el grupo de investigación GCIM, al Dr. Faber Correa Ballesteros, al ingeniero Juan de Jesús Galindo, quien me colaboró en todo lo relacionado con la empresa MVM Ltda., al Dr. Pedro Arango de la Universidad Nacional de Manizales, quien muy amablemente me facilitó el uso de equipos.

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	14
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	17
1. ANTECEDENTES	18
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	19
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2.2. FORMULACION DEL PROBLEMA	19
3. JUSTIFICACIÓN	20
4. OBJETIVOS	21
4.1. OBJETIVO GENERAL	21
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
5. MARCO REFERENCIAL	22
5.1. MARCO TEÓRICO	22
5.1.1. Definición de metalurgia de polvos (MP)	22
5.1.2. Desgaste por pin on disk	23

5.1.3. Asientos de válvulas para motores de combustión interna	24
6. DETALLES EXPERIMENTALES	26
6.1 MATERIALES	26
6.1.1 Aleación de acero	27
6.1.2 Aceros M2 y M3	28
6.2 DUREZA ROCKWELL C (HRC)	28
6.3 PRUEBA DE RESISTENCIA AL DESGASTE	29
6.4. ESTABILIDAD DIMENSIONAL	31
7. ANALISIS Y RESULTADOS	32
7.1. DUREZAS	32
7.2. PRUEBA DE DESGASTE	35
7.3. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL	37
7.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, SEM	43
7.5. PRUEBA DE ESTABILIDAD DIMENSIONAL	47
8 CONCLUSIONES	51
9 RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Elementos químicos de los materiales analizados	27
Tabla 2. Parámetros del ensayo pin on disk para asientos de válvula	31
Tabla 3. Dureza de asientos de válvulas	32
Tabla 4. Dureza Vickers (HVN)	34
Tabla 5. Parámetros utilizados en la prueba de desgaste (pin on disk)	35
Tabla 6. Valores de pérdida de masa por desgaste mediante pin on disk	35
Tabla 7. Porcentaje de poros del material de los asientos	41
Tabla 8. Extracción de la probeta a alta temperatura	50

LISTA DE CUADROS

Pág.

Cuadro 1. Estado de suministro de los asientos de válvulas

27

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas de la producción de MP	23
Figura 2. Esquema de tribómetro para ensayo de Pin on disk	24
Figura 3. Diagrama de ubicación de los asientos de válvulas	25
Figura 4. Estado de suministro de los asientos de válvulas	26
Figura 5. Asientos de válvulas	28
Figura 6. Durómetro AFFRI, modelo 206 EX, Universidad Autónoma de Occidente	29
Figura 7. Tribómetro para ensayo de desgaste por deslizamiento en seco; laboratorio GCIM, Universidad Autónoma de Occidente	30
Figura 8. Asiento de válvula de acero aleado, evaluada mediante Pin on disk	30
Figura 9. Coeficiente de Fricción Vs Recorrido	37
Figura 10. Micrografías de asientos de válvulas (500X); aleación de acero, acero M2, acero M3	38
Figura 11. Micrografías de asientos de válvulas (500X); acero M2 enfriado en N2, acero M3 enfriado en N2, acero M2 con revenido, acero M3 con revenido	39
Figura 12. Porcentaje de porosidad por área (100X); aleación de acero, acero M2, acero M3	40
Figura 13. Porcentaje de porosidad por área (100X); acero M2 enfriado en N2, acero M3 enfriado en N2, acero M2 con revenido, acero M3 con revenido	41

Figura 14. Microestructuras Esferoidal, Acero pulvimetalúrgico M2, Acero pulvimetalúrgico M3	42
Figura 15. Micrografías SEM; a. Polvo de Acero M2, b. Polvo de Acero M3, c. Polvo de aleación de acero	44
Figura 16. Micrografías SEM de asientos de válvulas	45
Figura 17. Micrografías SEM; Aleación de acero, Acero M2 sinterizado, Acero M3 sinterizado	46
Figura 18. Micrografías SEM; Acero M2 enfriado en N₂, Acero M3 enfriado en N₂, Acero M2 con revenido, Acero M3 con revenido	47
Figura 19. Asiento de válvula en tratamiento térmico	48
Figura 20. Asientos después del tratamiento térmico	48
Figura 21. Asientos después de la extracción. a. Asiento de acero M2 sinterizado, b. Asiento de acero M3 sinterizado	50

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Grafico 1. Dureza vs tipo de material para prueba de dureza (HRC)	33
Grafico 2. Durezas Vickers vs tipo de material para prueba de dureza Vickers	34
Grafico 3. Pérdida de masa vs tipo de material para pruebas de desgaste	36
Grafico 4. Diámetro exterior Vs tipo de material para prueba de estabilidad dimensional	49

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Datos de Dureza Vickers de asientos en material M2	56
Anexo B. Datos de dureza Vickers de asientos en material M3	57
Anexo C. Datos de Dureza Vickers de asientos en material de acero aleado	58
Anexo D. Datos de dureza Vickers de asientos en material M2 enfriado en N2	59
Anexo E. Datos de dureza Vickers de asientos en material M3 enfriado en N2	60
Anexo F. Datos de dureza Vickers de asientos en material M2 con revenido	61
Anexo G. Datos de dureza Vickers de asientos en material M3 con revenido	62
Anexo H. Datos de dimensiones de las probetas 1	63
Anexo I. Datos de dimensiones de las probetas 2	64

GLOSARIO

ASIENTO DE VÁLVULA: es la superficie de apoyo de la cabeza de la válvula con la cámara de combustión.

DESGASTE DE SUPERFICIES SÓLIDAS: es la pérdida de material sufrida en una superficie sólida debido a la fricción con otra superficie.

DUREZA: es una oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes, entre otras.

PULVIMETALURGIA: es un proceso de fabricación que, partiendo de polvos finos se compactan y se sinterizan para darles una forma determinada.

SINTERIZACIÓN: es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.

ALEAMIENTO MECÁNICO: es una técnica de procesamiento en estado sólido que permite producir aleaciones a partir de la mezcla de polvos elementales o polvos prealeados.

PREALEADO: el material en polvo se encuentra parcialmente unido a nivel químico.

TRIBOLOGÍA: ciencia que estudia los fenómenos relacionados con la fricción.

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO: técnica que utiliza un haz de electrones para crear una imagen de alta resolución y profundidad.

DIFRACCIÓN DE ELECTRONES DISPERSADOS: técnica utilizada para determinar la composición química de un material en una zona específica. Esta se realiza en un microscopio electrónico de barrido.

RESUMEN

Este trabajo de grado hace parte del proyecto macro titulado: **Producción y caracterización de aleaciones de hierro grafitado y acero aleado obtenidas por aleamiento mecánico**, realizado entre el grupo GCIM de la Universidad Autónoma de Occidente y la empresa MVM. En esta empresa producían los asientos de válvulas para motores Diesel, con un acero aleado pulvimetalúrgico, pero al colocarlos en funcionamiento en el motor, presentaban pérdida de estabilidad dimensional, ocasionando que el asiento se saliera de la culata, debido a una reducción en el ajuste, este fenómeno se presentaba al disminuir la temperatura del motor, causando daños al encenderlo nuevamente. El objetivo de esta investigación se basó en caracterizar y seleccionar la aleación de acero pulvimetalúrgico que cumpliera con las especificaciones para fabricar asientos de válvulas para este tipo de motores.

Se analizaron tres tipos de materiales en polvo: acero aleado, acero M2 y acero M3. Los materiales seleccionados tenían diferentes composiciones, de alto contenido en carbono, cromo, molibdeno y tungsteno, obtenidas mediante dos procesos diferentes: mezclado y pre-aleado. Se realizó microscopía óptica, donde se caracterizó la microestructura y el porcentaje de porosidad en área del material, además microscopia electrónica de barrido SEM, para analizar el mecanismo de desgaste, se determinó la dureza de los materiales en las piezas producidas, como parámetro de comparación con los asientos de válvulas para motores diesel del mercado automotriz y se evaluó el desgaste de los asientos por la prueba Pin on disk, para analizar la pérdida de material y obtener el coeficiente de fricción. Por último se determinó la estabilidad dimensional para cada uno de los asientos de válvulas con las diferentes aleaciones suministradas por la empresa MVM. Se simuló una culata a la que se le colocaron los asientos y se le sometió a diferentes temperaturas similares a las de los motores diésel, para determinar el material apropiado que cumpliera los requerimientos de funcionamiento de estos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en cada una de las pruebas que se realizaron a los materiales pulvimetalúrgicos acero aleado, M2 y M3, se puede decir que el acero M3 sinterizado, cumple con todas las exigencias requeridas para fabricar los asientos de válvula para motores diésel. Se encontró que el acero M3 y M2 presentaron alta estabilidad dimensional al someterlo a la prueba. Con esta investigación, la empresa MVM ha incrementado su productividad y competencia ante otras empresas que realizan mediante diferentes procesos de fabricación el mismo tipo de piezas.

Palabras claves: acero pulvimetalúrgico, coeficiente de fricción, dureza, mezclado, motores Diesel, pérdida de estabilidad dimensional, pre-aleado

INTRODUCCIÓN

El uso de los materiales en polvo data aproximadamente desde el año 3000 A.C, utilizado por los egipcios, africanos y asiáticos, en fabricación de herramientas, decoración de cerámicas, producción de manuscritos, tintas para pinturas y fines cosméticos, también se registra que los incas producían cementaciones de granos de platino en el 1200 D. C.¹ Pero esta técnica se empezó a explotar realmente durante el siglo XX, debido a los avances tecnológicos de la segunda guerra mundial, donde la industria de la Metalurgia de Polvos se creó como tal. Desde entonces, gracias a los continuos avances de esta industria, la calidad y utilidad de los productos sinterizados; ha crecido más rápidamente que cualquier otro proceso de manufactura de piezas metálicas.

El proceso Pulvimetalurgia (PM) es un proceso de fabricación de piezas mecánicas mediante la compresibilidad de polvos metálicos puros o aleados que se consolidan generalmente por presión de la mezcla de polvos, y posteriormente se le realiza un calentamiento a la pieza por debajo de la temperatura de fusión, logrando que esta adquiera las propiedades físicas y mecánicas deseadas, es posible obtener piezas y componentes de alta calidad en una gran variedad de formas con tolerancias precisas, llevando consigo un mejor aprovechamiento de la materia prima y la eliminación de etapas de fabricación, convirtiéndolo en un proceso con un costo relativamente bajo¹.

Como futuro Ingeniero Mecánico y dado los conocimientos adquiridos a través del desarrollo de la carrera universitaria, en especial los obtenidos en las áreas de Materiales y Procesos, se ha propuesto dar solución a una problemática que tiene actualmente la empresa MVM Ltda., en los asientos de válvulas pulvimetalúrgicos para motores Diésel. Esta problemática se debe a falta de estabilidad dimensional de los asientos de válvulas para este tipo de motores.

¹ Peter W. Lee. Powder Metal Technologies and Applications, Volume 7 of ASM Handbook, 1998. p 10.

1. ANTECEDENTES

MVM Ltda es una empresa metalmecánica fundada en 1985, la cual inició con la fabricación de bujes para eje de levas y maquinaria para la rectificación de motores. En el año 1999 MVM desarrolló las guías para válvula de motor, en el 2003 las camisas para motor y en el 2010 desarrolló el proceso para la producción de piezas por medio de la Metalurgia de Polvos (MP), logrando así expandir sus fronteras e incursionando mercados muy exigentes y competitivos como: México, Venezuela, Ecuador y Estados Unidos de América.

Actualmente en Colombia el mercado de autopartes se ha vuelto muy competitivo en cuanto a calidad y precios, lo cual conlleva a las empresas a realizar procesos de estandarización y de caracterización de materias primas y productos terminados respectivamente, con el propósito de ofrecerle al cliente un instructivo detallado sobre las propiedades fisicomecánicas de las piezas fabricadas y así poder manifestar mayor calidad del producto.

El grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales GCIM ha trabajado en el tema de Materiales en polvo, mediante proyecto financiado por Colciencias, la Universidad del Valle, la Universidad Santiago de Cali y la Universidad Autónoma de Occidente, se diseñaron y fabricaron dos molinos de bolas para realizar aleamiento Mecánico.

Además el grupo publicó el libro Fundamentos y aspectos generales del Aleamiento Mecánico, donde se presentan resultados de varios trabajos de grado dirigidos en esta línea de investigación².

²JARAMILLO SUAREZ, Héctor Enrique; ALBA DE SANCHEZ, Nelly Cecilia y AVILA, Julián Arnaldo. Fundamentos y aspectos generales del Aleamiento Mecánico. Santiago de Cali 2011. Universidad Autónoma de Occidente. Grupo de Investigación en Ciencia e Ingeniería de los Materiales GCIM.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con la información, a nivel mundial, disponible en Internet, los fabricantes y proveedores de asientos de válvulas para motores Diésel están en China y usan el proceso de metalurgia de polvos en la fabricación³. Las materias primas procesadas comúnmente son arrabio (hierro fundido), manganeso, carbono y bronce. La única empresa fabricante de estas piezas en Colombia es MVM Ltda., pero tradicionalmente lo han hecho mediante el proceso de fundición, y sólo para motores a gasolina. Con la ejecución de proyectos de innovación y desarrollo, actualmente la empresa cuenta con una línea completa de metalurgia de polvos y está en desarrollo la producción de guías y asientos de válvula para motores de gasolina, en lo cual, el grupo GCIM de la UAO ha participado. En este proyecto se pretende desarrollar los asientos para motores diésel, y se debe obtener la aleación de acero que la empresa usara en el proceso de fabricación, que cumpla los requerimientos de funcionamiento en un motor diésel, de tal manera que iguale o supere en calidad las piezas importadas. En este contexto, es de particular interés, estudiar la influencia que puede ejercer el tipo de aleación, mezclada o pre-aleada, en la dureza y en las propiedades tribológicas de las piezas, como el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste por deslizamiento, con lo cual se determinará la factibilidad técnica de fabricación por pulvimetalurgia y se evaluará su futuro desempeño en el motor.

2.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

Surge entonces la pregunta que se pretende responder en esta investigación:
¿Qué mezcla de polvos aleados, presentará las mejores propiedades tribológicas y de dureza, para fabricar los asientos de las válvulas para motores diésel?

³ Alibaba [en línea]: motor diésel asiento de la válvula. 2013, [consultado el 25 de noviembre de 2013]. Disponible en internet: http://spanish.alibaba.com/trade/search?selectedTab=product&csrf_token=cqvggoubilh&SearchText=motor+diesel+asiento+de+la+v%C3%A1lvula

3. JUSTIFICACIÓN

Es ampliamente conocido que una de las ventajas que presentan las piezas sinterizadas es la autolubricación, lo cual se debe a la porosidad que caracteriza este tipo de piezas⁴. En el caso de motores de combustión interna a gasolina o diésel, es muy conveniente que las partes que están constantemente lubricadas, como las guías y asientos de las válvulas por ejemplo, se fabriquen por metalurgia de polvos, pues su vida útil frente al desgaste será mucho mayor. Otra ventaja de usar el proceso de metalurgia de polvos, es la reducción, o en algunos casos, la eliminación de operaciones de maquinado posterior, como sucede en la fabricación de las guías y asientos de válvulas donde se elimina el proceso de taladrado, necesario cuando se hacen por proceso de fundición. Esto conduce al mejoramiento de la productividad de la empresa fabricante y consecuentemente, la hace competitiva en el mercado nacional e internacional y posiciona a la empresa, en este caso a MVM Ltda., al nivel de grandes multinacionales que usan la tecnología moderna de la metalurgia de polvos.

Considerando que MVM cuenta con la infraestructura para producir piezas por pulvimetalurgia, es necesario y prioritario desarrollar nuevos productos en la línea de partes para motores de combustión interna, buscando reemplazar piezas hechas por fundición, por piezas fabricadas con pulvimetalurgia. Esta innovación en la materia prima y los procesos de fabricación, requiere de la experimentación y el diseño y fabricación de herramientas nuevas, lo cual demanda tiempo y personas dedicadas a estas labores y generalmente las empresas tienen muchas limitaciones para desarrollar investigación paralela a la producción. La alianza Universidad - Empresa soluciona, en gran parte, esta dificultad y en este caso, el grupo GCIM de la UAO, dentro del macro proyecto está realizando la investigación en lo relacionado con la definición del tipo de material pulvimetalúrgico, que cumpla los requerimientos para la fabricación de asientos de válvulas de motores diésel. De esta manera se contribuye al desarrollo de la industria local y al mejoramiento de la competitividad de la empresa MVM.

⁴ ALBA DE SANCHEZ, Nelly Cecilia; Cañizales, Juan Pablo y Sánchez Sthepa, Héctor. Mecanosítesis de carburo de titanio. Santiago de Cali, 2004. p.10-11. Proyecto de investigación profesoral. Universidad Autónoma de Occidente, Universidad del Valle. Facultad de ingenierías.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar y seleccionar la mezcla de polvos aleados apropiada dependiendo de las propiedades mecánica y tribológicas para la fabricación de asientos para válvulas de motores Diesel.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las propiedades tribológicas y la dureza de un asiento de válvulas obtenido con cada aleación, para determinar la de mejor desempeño.
- Determinar la estabilidad dimensional de los asientos de válvula a diferentes temperaturas.
- Determinar la aleación de acero que cumpla con los requerimientos para ser utilizado en la fabricación de asientos de válvulas para motores Diésel.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. MARCO TEÓRICO

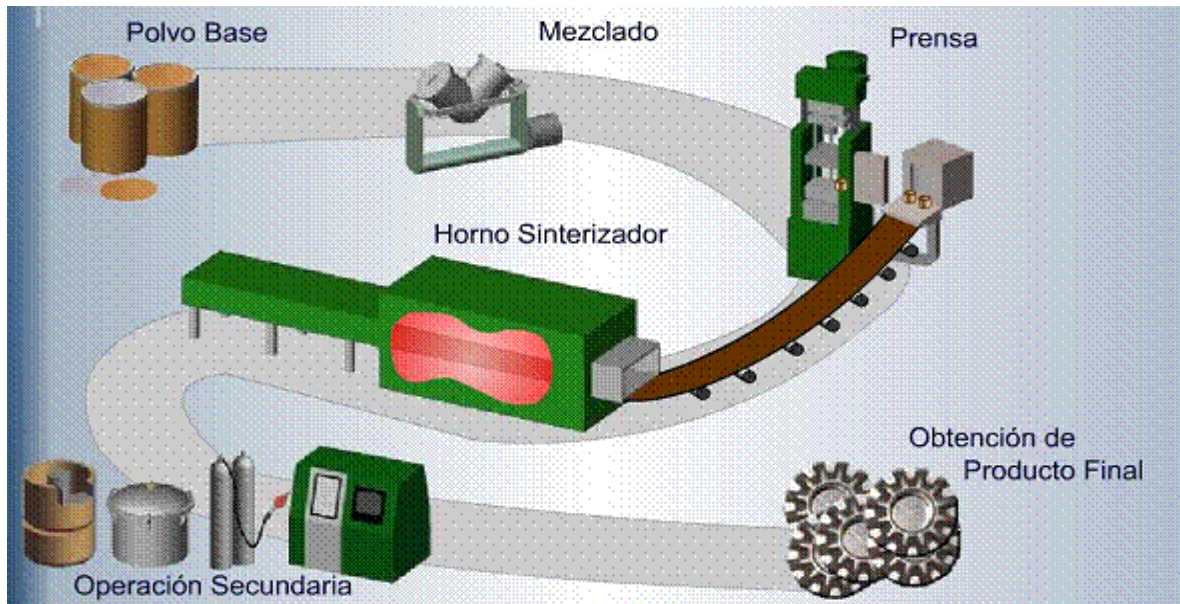
5.1.1. Definición de metalurgia de polvos (MP). La Metalurgia de Polvos es un proceso de fabricación que, partiendo de polvos finos y tras su compresibilidad para darles una forma determinada, se calientan en atmósfera controlada (sinterizado) para la obtención de la pieza⁵; esta técnica de manufactura moderna, la cual inicio aproximadamente en el 3000 A.C., y tuvo una gran explotación en el siglo XX durante la primera guerra mundial, permite la fabricación de piezas con alta precisión, para obtener geometrías complejas, producir grandes series y ofrecer porosidad controlada para auto lubricación, con lo cual se hace altamente fiable y económicamente competitiva⁶.

El proceso de producción de metalurgia de polvos mostrado en la Figura 1, consta principalmente de cuatro etapas, las cuales son: Determinación del Polvo base, mezclado, prensado y sinterizado.

⁵ Fabricación de piezas metálicas sinterizadas y cojinetes auto lubricados [en línea]: Etapas de la producción por MP. MVM Ltda. 2011, [consultado el 15 de octubre de 2013]. Disponible en internet: http://www.mvmltda.com/es/piezas_sinterizadas.html

⁶ Guliaev A.P. Metalografía. Moscú: Metalurgia, 1986.

Figura 1. Etapas de la producción de MP

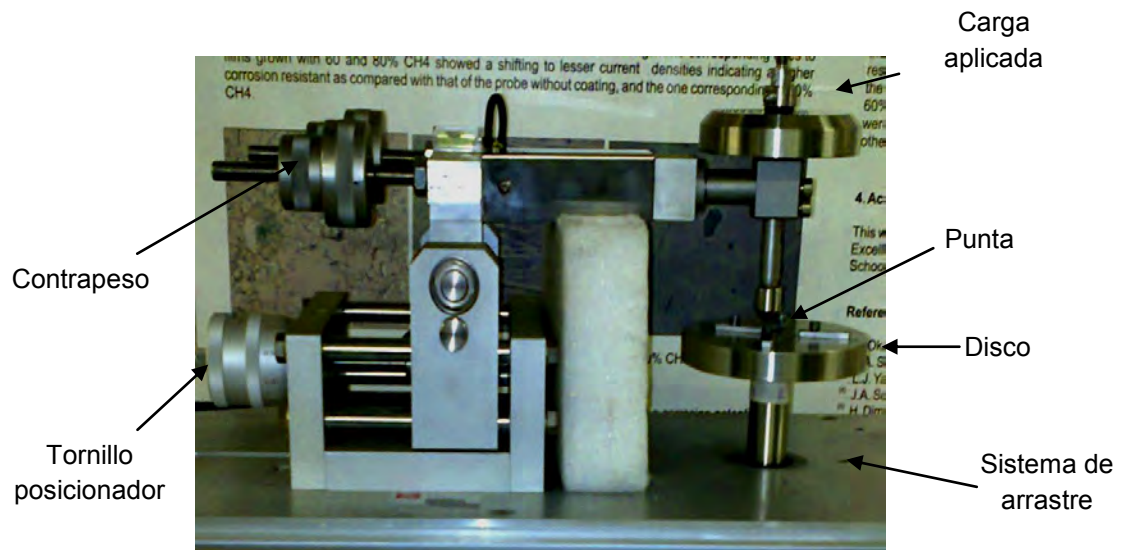


Fuente: Fabricación de piezas metálicas sinterizadas y cojinetes auto lubricados [en línea]: Etapas de la producción por MP. MVM Ltda. 2011, [consultado el 15 de octubre de 2013]. Disponible en internet: http://www.mvmltda.com/es/piezas_sinterizadas.html

5.1.2. Desgaste por pin on disk. Es una técnica de medida del coeficiente de desgaste, basada en la determinación del volumen del material desgastado en una muestra por la acción de una punta redondeada de un material duro, y sometida a una carga deslizándose repetidamente sobre la superficie de la muestra como se muestra en la Figura 2. El desgaste se mide por pérdida de peso o por análisis de la huella⁷.

⁷ Guliaev A.P. Metalografía. Moscú: Metalurgia, 1986.

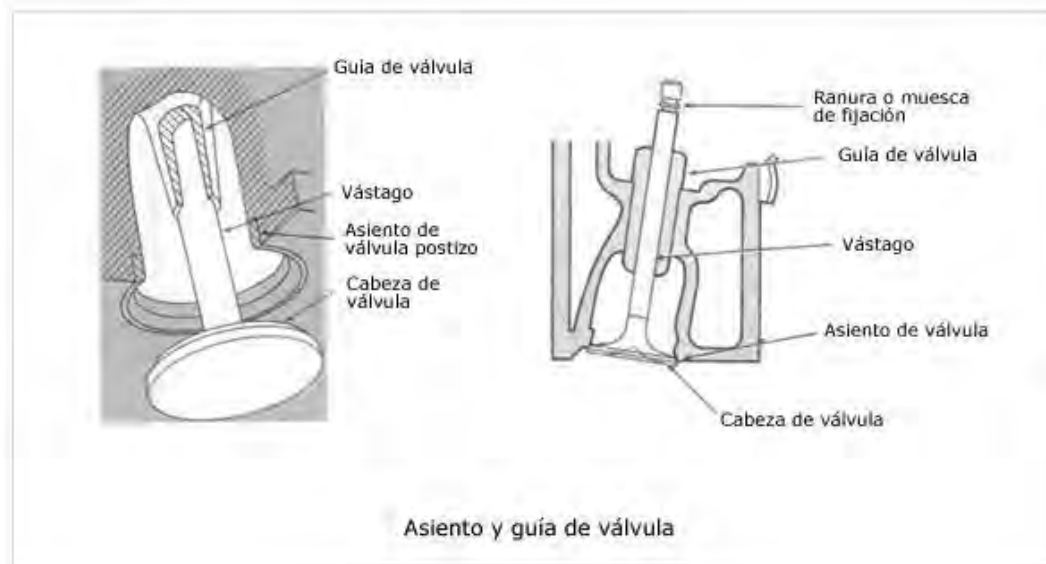
Figura 2. Esquema de tribómetro para ensayo de Pin on disk



5.1.3. Asientos de válvulas para motores de combustión interna. Son piezas postizas insertadas sobre la culata para evitar el desgaste de esta, puesto que es demasiado blanda en comparación con las válvulas, las cuales trabajan bajo fricción, altas temperaturas, aproximadamente de 600°C y presiones de 6 MPa, generadas dentro de la cámara de combustión. Es por esta razón que los asientos de válvulas son fabricados en materiales con alta dureza como: fundiciones grises centrifugadas y nitruradas, aleadas con Cromo-Níquel, aceros para herramienta, con altos porcentajes de níquel, cromo y manganeso generando carburos de alta resistencia al desgaste⁸.

⁸ Elementos móviles [en línea]: Asientos de válvulas. Aficionados a la mecánica. 2014, [consultado el 20 de Febrero de 2014]. Disponible en internet: <http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-distribucion.htm>

Figura 3. Diagrama de ubicación de los asientos de válvulas



Fuente: Elementos móviles [en línea]: Asientos de válvulas. Aficionados a la mecánica. 2014, [consultado el 20 de Febrero de 2014]. Disponible en internet: <http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-distribucion.htm>

En la figura 3 se observa la ubicación de los asientos de válvulas, los cuales se encuentran alojados en un cámara que se le realiza a la culata con un ajuste aproximado de 4 milésimas de pulgada, a estos se les realiza también un chaflán sobre el diámetro interno para asegurar que la cámara de combustión este sellada herméticamente, debido al contacto entre la válvula y el asiento.

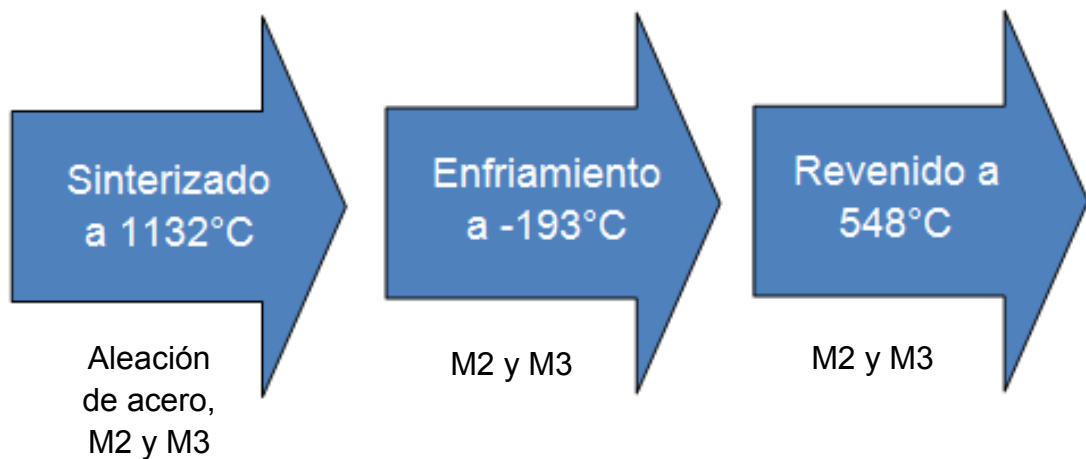
Teniendo en cuenta este marco teórico, se caracterizaron los materiales programados en el proyecto y se dio cumplimiento a la evaluación de las propiedades tribológicas y mecánicas de cada aleación para determinar cuál se desempeñaba mejor, posteriormente se determinó la estabilidad dimensional de los asientos de válvula a diferentes temperaturas.

6. DETALLES EXPERIMENTALES

6.1 MATERIALES

Los materiales en polvo trabajados en esta investigación fueron adquiridos por la empresa MVM, la empresa fabricó los asientos de válvulas mediante los procesos de prensado, utilizando cargas entre 60 a 95 T, posteriormente se les aplicó proceso de sinterizado a 1132°C , seguido de un enfriamiento en nitrógeno líquido hasta temperatura de -193°C y finalmente se le realizó tratamiento térmico de revenido a temperatura de 548°C . Los estados de suministro de los asientos de válvulas para su análisis se presentan en la figura 4 y en el cuadro 1. Se recibieron 5 asientos de válvulas en cada uno de los estados de suministro de los materiales de acero aleado, M2 y M3.

Figura 4. Estado de suministro de los asientos de válvulas



Cuadro 1. Estado de suministro de los asientos de válvulas

	Sinterizado (1132 °C) 5 asientos (c/material)	Enfriado en N₂ (-193 °C) 5 asientos (c/material)	Revenido (548 °C) 5 asientos (c/material)
Aleación de acero	X		
M2	X	X	X
M3	X	X	X

Los porcentajes de los elementos químicos de cada material trabajado en esta investigación no se revelan por políticas de la empresa, por tal motivo se nombraron como aleación de acero, M2 y M3. Para la investigación se recibieron de parte de la empresa MVM material en polvo y asientos en sus diferentes estados de suministro fabricados en los tres tipos de materiales para su análisis.

6.1.1 Aleación de acero. La aleación de acero pulvimetalúrgico identificada así por la empresa MVM contiene alto contenido de carbono, cromo, molibdeno y tungsteno, los asientos de válvulas analizados a partir de este material fueron sometidos a un proceso de sinterizado a una temperatura de 1032 °C, dependiendo del ensayo se montaron probetas de baquelita. Este material lo adquiere la empresa MVM a una empresa extranjera. En la tabla 1 se presentan los elementos químicos de los diferentes materiales analizados.

Tabla 1. Elementos químicos de los materiales analizados

	Composición química												
Aleación de acero	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	O	Si	V	W		
M2 (% ↑)	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	O	Si	V	W	Ni	P S
M3 (% ↑↑)	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	O	Si	V	W	Ni	P S

6.1.2 Aceros M2 y M3. Los aceros pulvimetalúrgicos M2 y M3 identificados así por la empresa MVM, presentan elementos de aleación similar a la aleación de acero, pero los porcentajes de composición son superiores, además contienen tres elementos adicionales como el níquel, fósforo y azufre. Para los ensayos realizados a estos materiales se tomaron asientos en los diferentes estados de suministro.

6.2 DUREZA ROCKWELL C (HRC)

Para la prueba de dureza Rockwell C (HRC) en los asientos de válvula, se tomaron tres medidas de dureza sobre la cara que está en contacto con la válvula, asumiendo que la dureza está relacionada con el desgaste y el cambio de estabilidad dimensional, se determinó el valor promedio de la dureza de cada uno de los asientos de válvulas, en la figura 5 se presenta una fotografía de asientos de válvulas. Para estas pruebas de dureza se utilizó el durómetro AFFRI, modelo 206 EX observado en la figura 6, el cual utiliza una punta tipo cono de diamante de 120° y se aplicaron cargas de 1471 N para las indentaciones.

Figura 5. Asientos de válvulas



Figura 6. Durómetro AFFRI, modelo 206 EX, Universidad Autónoma de Occidente



6.3 PRUEBA DE RESISTENCIA AL DESGASTE

Mediante prueba de Pin on disk se midió la resistencia al desgaste en asientos de válvulas para determinar su desgaste por abrasión. Se evaluó el coeficiente de desgaste por fricción para cada muestra, utilizando el equipo tribómetro para ensayo de desgaste por deslizamiento en seco, el cual está conformado por un brazo que va unido a un porta pines, un plato porta muestras de 100 mm de diámetro, un dinamómetro electrónico que mide la fuerza de fricción y un sistema de control que permite cambiar la señal mecánica a señal eléctrica como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Tribómetro para ensayo de desgaste por deslizamiento en seco; laboratorio GCIM, Universidad Autónoma de Occidente



La prueba consiste en determinar la pérdida de peso de material que se produce sobre la superficie de mayor desgaste de una muestra, por la acción de una punta redondeada de un material duro, y sometida a una carga, que se desliza repetidamente sobre la superficie de la muestra observada en la Figura 8, para la cual se utilizaron los parámetros de la tabla 2, estos fueron registrados como parámetros de entrada a través del software MT 4001 – 98 del equipo.

Figura 8. Asiento de válvula de acero aleado, evaluada mediante Pin on disk



Tabla 2. Parámetros del ensayo pin on disk para asientos de válvula

Dato	Medida
Radio del circulo de recorrido (mm)	23.5
Recorrido (m)	2000
Velocidad angular (rpm)	200
Carga (N)	10

6.4. ESTABILIDAD DIMENSIONAL

Para determinar la estabilidad dimensional de los asientos de válvulas para motores Diesel, estos se introdujeron en una matriz que simula la culata del motor, con un ajuste de 4 milésimas de pulgada, luego se calentaron en un horno simulando temperaturas por encima de las que puede llegar un motor, se llevaron a un rango de 700, 800, 900 y 1000°C. Al llegar a cada una de las temperaturas de prueba, se sostuvo esta temperatura durante media hora y luego las piezas se dejaron enfriar dentro del horno, al igual que sucede normalmente en el motor de un automóvil. La temperatura se tomó como parámetro de comparación.

7. ANALISIS Y RESULTADOS

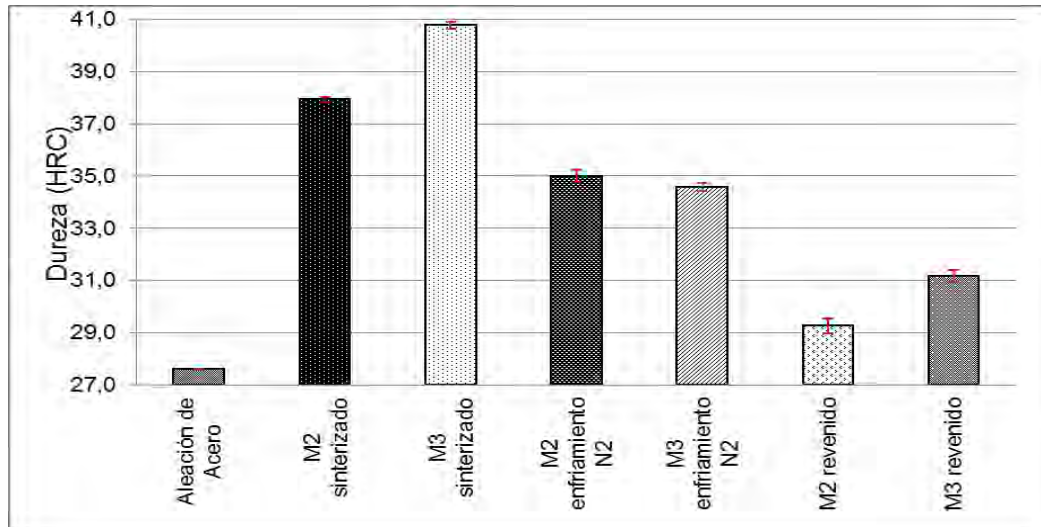
7.1. DUREZAS

Se tomaron durezas Rockwell C y Vickers a los asientos fabricados con material en polvo M2, M3 y acero aleado. En la tabla 3 se presenta los resultados de dureza (HRC).

Tabla 3. Dureza de asientos de válvulas

Indentación	Aleación de Acero	M2 sinterizado	M3 sinterizado	M2 enfriamiento N2	M3 enfriamiento N2	M2 revenido	M3 revenido
1	27,5	38,6	39,5	37,3	35,4	27,8	33,5
2	27,9	38,1	41,7	34,5	33,0	27,9	30,1
3	27,4	37,1	41,1	33,2	35,3	32,1	29,9
Promedio	27,6	37,9	40,8	35,0	34,6	29,3	31,2
Desviación Estándar	0,265	0,764	1,137	2,095	1,358	2,454	2,023
Error estándar	0,029	0,085	0,126	0,233	0,151	0,273	0,225

Grafico 1. Dureza vs tipo de material para prueba de dureza (HRC)



Se observa en los resultados del grafico 1 que los valores de dureza de los acero pulvimetalúrgicos M2 y M3 son más elevados que la dureza del acero aleado, lo cual concuerda con los valores del material en volumen debido a que se trata de aceros para la fabricación de herramientas de corte que presentan alta dureza y alta resistencia al desgaste.

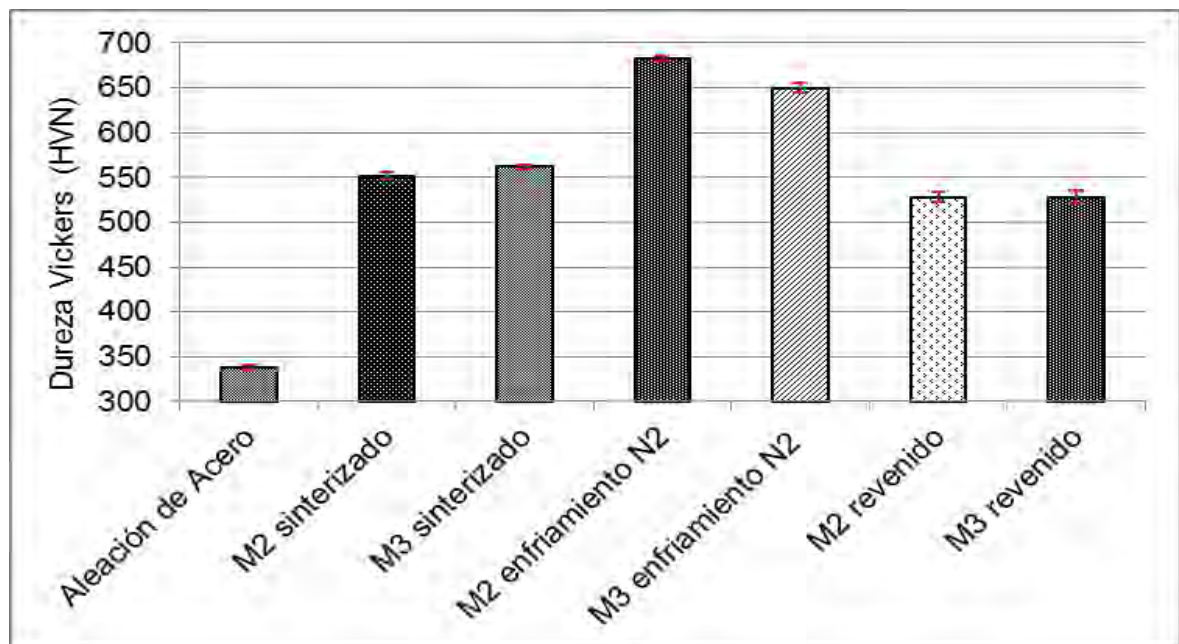
De acuerdo a los resultados se observa que el material M3 presenta mayor dureza que el material M2, lo cual se debe a que el M3 tiene mayor porcentaje de carbono, vanadio, molibdeno y tungsteno; mientras que el acero aleado presentó dureza más baja que los aceros M2 y M3. Se observa que el material que presentó menor dispersión de datos fue la aleación de acero, ya que sus datos no estaban tan alejados de la media, por el contrario en el material de acero M2 revenido fue el materia que más presento variación en la toma de durezas.

Tomamos dureza Vickers a los asientos en los diferentes estados de suministro para determinar su variación de acuerdo a los porcentajes de porosidad del material, debido a que este tipo de dureza es a nivel micro. En la tabla 4 se presentan los datos resumidos de los anexos A hasta G, que se presentan las tablas de resultados de dureza Vickers, se observaron variaciones significativas en los valores debido a que se trata de un material en polvo que al sinterizarse presenta alta porosidad, como se observa en el grafico 2.

Tabla 4. Dureza Vickers (HVN)

Indentación	Aleación de Acero	M2 sinterizado	M3 sinterizado	M2 enfriamiento N2	M3 enfriamiento N2	M2 revenido	M3 revenido
1	273	591	502	615	425	390	347
2	275	649	524	751	686	631	566
3	300	571	652	801	790	603	467
4	397	538	553	604	719	632	467
5	445	410	581	643	627	386	793
Promedio	338	552	562	682,8	649,4	528	528
Desviación Estándar	78,37	88,95	58,28	88,05	138,57	128,70	167,24
Error estándar	3,13	3,56	2,33	3,52	5,54	5,15	6,69

Grafico 2. Durezas Vickers vs tipo de material para prueba de dureza Vickers



Los resultados mostraron que los asientos M2 y M3 enfriados con N₂ presentaron el mayor valor de dureza aproximadamente de 670 y 650 respectivamente. También se muestra la desviación estándar de la dureza para cada material. El

asiento que presentó menor variación de datos fue el acero M3 sinterizado con 60 HRC de diferencia y este fue el material que presento menor porcentaje de porosidad.

7.2 PRUEBA DE DESGASTE

Se realizaron pruebas de resistencia al desgaste mediante la prueba pin on disk, para los asientos fabricados con la mezcla de polvos M2, M3 y el acero aleado utilizado en asientos para motores a gas y a gasolina sin alear mecánicamente. Las condiciones para realizar cada prueba y los datos obtenidos se muestran en las tablas 5 y 6, y en el gráfico 3.

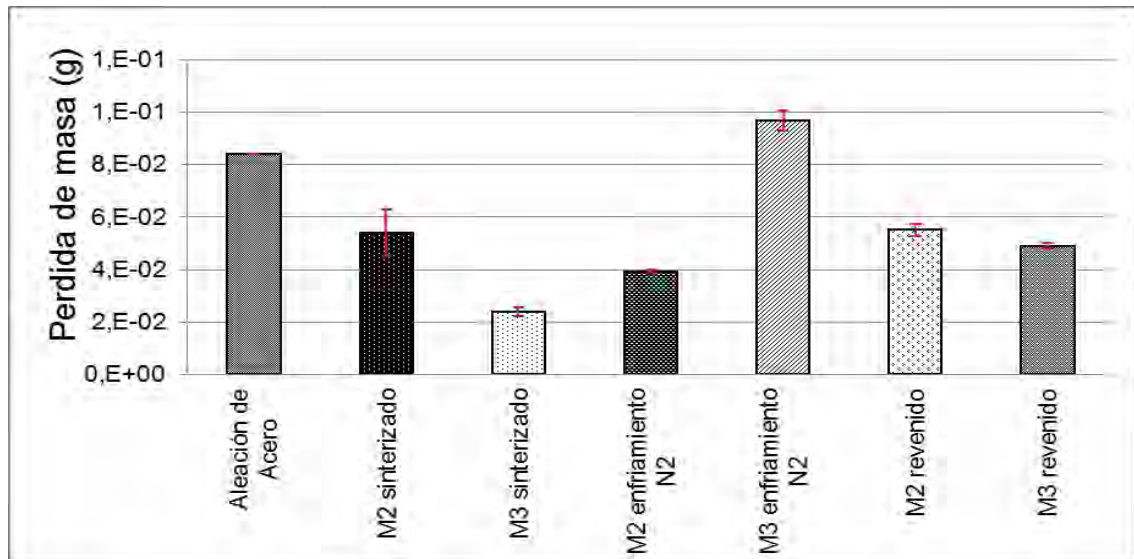
Tabla 5. Parámetros utilizados en la prueba de desgaste (pin on disk)

Parámetro	Valor
Acabado superficial de la probeta	Tipo espejo
Recorrido (m)	2000
Velocidad de prueba (r.p.m.)	200
Radio de la pista (mm)	23.5
Carga aplicada (N)	10

Tabla 6. Valores de pérdida de masa por desgaste mediante pin on disk

Prueba	Aleación de Acero	M2 sinterizado	M3 sinterizado	M2 enfriamiento N2	M3 enfriamiento N2	M2 revenido	M3 revenido
1	8,E-02	3,E-03	2,E-02	3,E-02	7,E-02	7,E-02	4,E-02
2	8,E-02	1,E-02	4,E-02	4,E-02	1,E-01	7,E-02	6,E-02
3	8,E-02	1,E-01	1,E-02	5,E-02	8,E-02	3,E-02	5,E-02
Promedio	8,E-02	5,E-02	2,E-02	4,E-02	1,E-01	6,E-02	5,E-02
Desviación estándar	0,00015	0,08171	0,01531	0,00821	0,03464	0,02275	0,00934
Error estándar	0,00002	0,00908	0,00170	0,00091	0,00385	0,00253	0,00104

Grafico 3. Pérdida de masa vs tipo de material para pruebas de desgaste



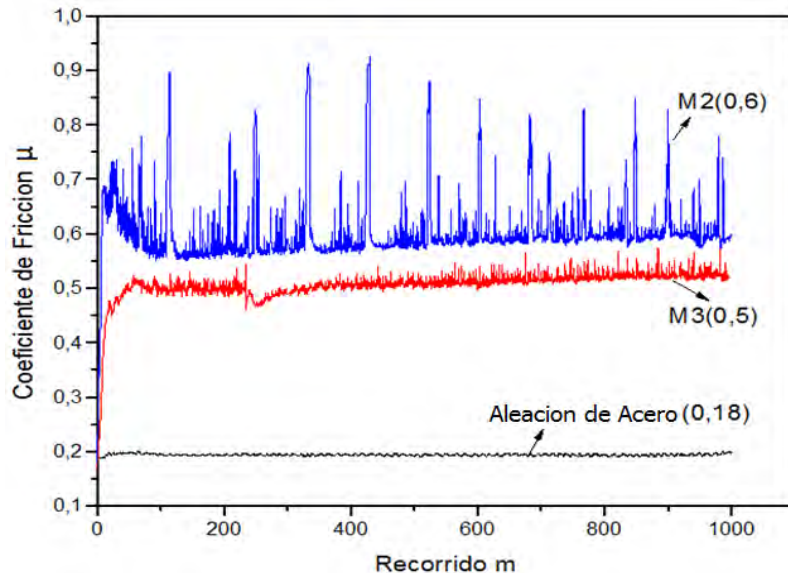
En Grafico 3 se observa que los asientos de material M3 Sinterizado y M2 con enfriamiento en Nitrogeno fueron los que presentaron menor perdida de masa, con valores de 2×10^{-2} y 4×10^{-2} gramos consecuentemente, por otro lado la aleación de acero y M3 con enfriamiento en nitrógeno presentaron el mayor desgaste con valores de 8×10^{-2} y 1×10^{-1} gramos respectivamente. También presenta la desviación estándar para los datos obtenidos de la prueba de desgaste. El asiento que menos desviación estándar obtuvo en sus datos fue la aleación de acero, con cero gramos de diferencia. Por otro lado el asiento M2 sinterizado obtuvo la mayor dispersión de datos con una diferencia de 0,08 gramos aproximadamente.

De la prueba de pin on disk se obtuvieron las curvas de coeficiente de fricción versus recorrido del pin sobre la muestra, se graficaron y se presentan en la figura 9. El acero aleado presentó bajo coeficiente de fricción con un promedio igual a 0.18, este valor fue constante en todo el recorrido del proceso. Los aceros M2 y M3 presentaron valores promedios de coeficiente de fricción de 0.6 y 0.5 respectivamente.

Con los datos obtenidos de las pruebas de dureza y desgaste, se concluyó que la dureza tiene relación con la pérdida de masa, otra propiedad que también influye es la porosidad la cual se ve reflejada en el aumento de los picos presentes en las figura 8. Debido a las vibraciones creadas por la irregularidad de la superficie de

cada material, dicho aumento es proporcional al aumento de la porosidad, lo que conlleva a una mayor pérdida de masa.

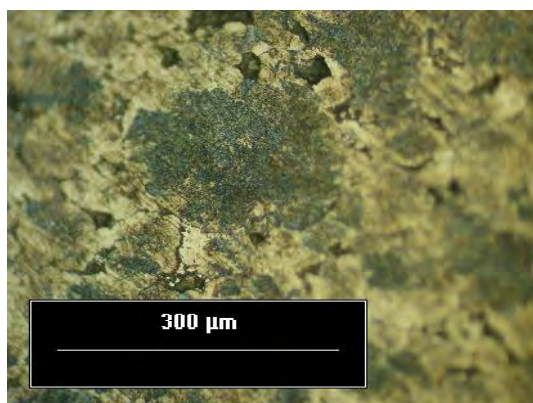
Figura 9. Coeficiente de Fricción Vs Recorrido



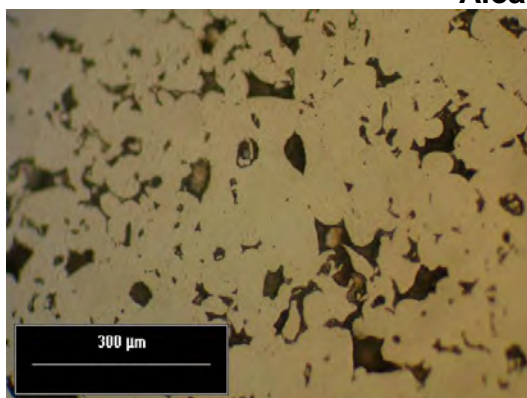
7.3. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

Las micrografías ópticas de las muestras se presentan en las figuras 10 y 11, se observa alta porosidad en la micrografía del acero M2, este problema se evidencia en las gráficas de coeficiente de fricción donde este acero presentó el mayor valor de coeficiente de fricción, debido a la gran cantidad de poros. Se evidencia que el acero M3 presenta menor cantidad de poros que el acero M2, mientras que en la aleación de acero la porosidad es relativamente baja, lo cual está relacionado con el coeficiente de fricción y la dureza en el caso de los aceros M2 y M3 sinterizados. En la tabla 7 se detalla el porcentaje de porosidad, el cual fue tomado en un área de $71122,7413 \mu\text{m}^2$, como se muestra en las figuras 12 y 13.

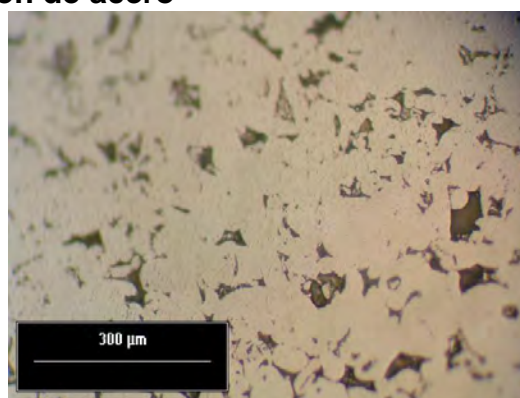
Figura 10. Micrografías de asientos de válvulas (500X); aleación de acero, acero M2, acero M3



Aleación de acero

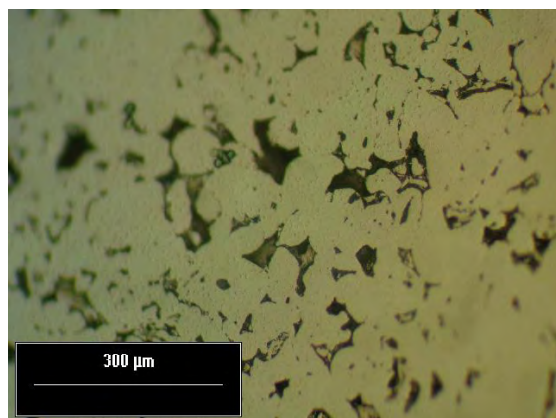


Acero M3 sinterizado

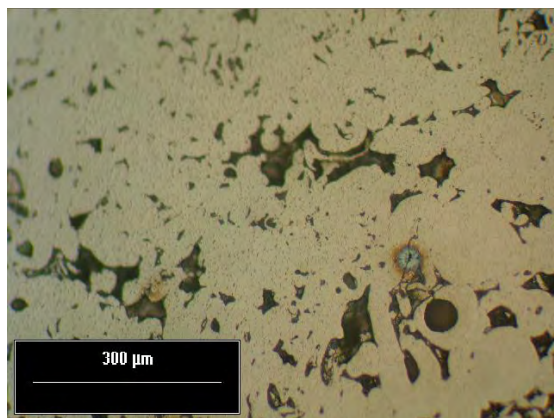


Acero M2 sinterizado

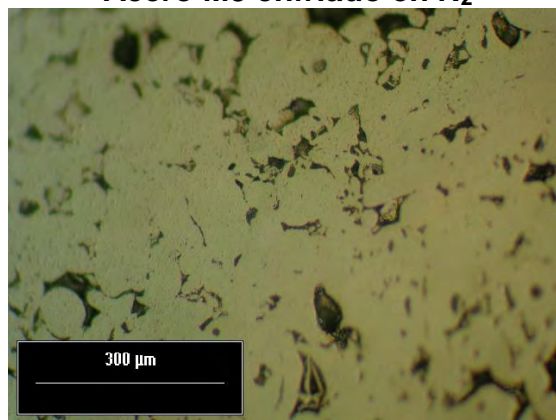
Figura 11. Micrografías de asientos de válvulas (500X); acero M2 enfriado en N₂, acero M3 enfriado en N₂, acero M2 con revenido, acero M3 con revenido



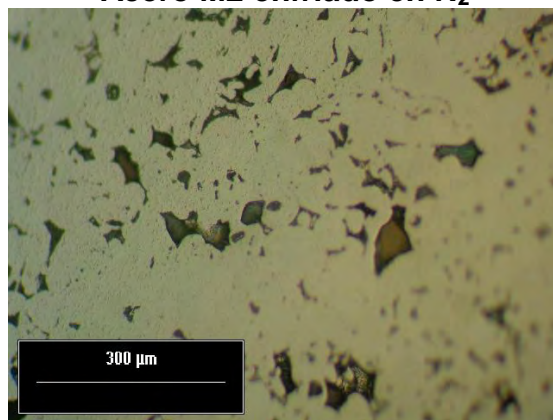
Acero M3 enfriado en N₂



Acero M2 enfriado en N₂

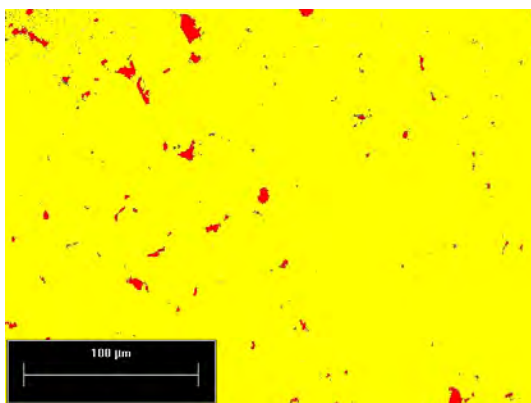


Acero M3 revenido

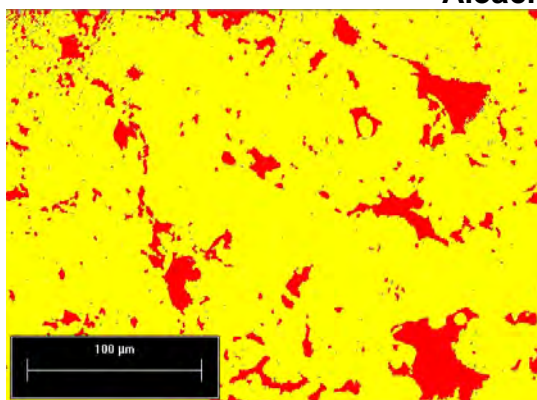


Acero M2 revenido

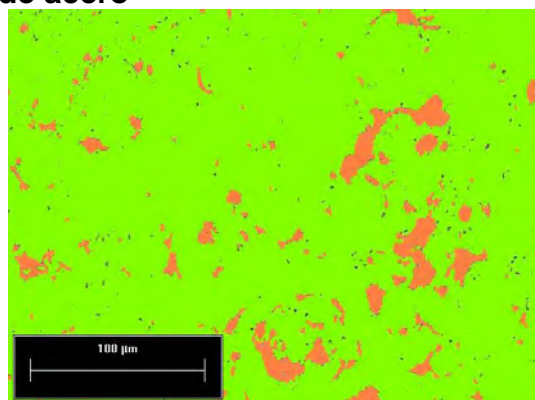
Figura 12. Porcentaje de porosidad por área (100X); aleación de acero, acero M2, acero M3



Aleación de acero



Acero M3 sinterizado



Acero M2 sinterizado

Figura 13. Porcentaje de porosidad por área (100X); acero M2 enfriado en N₂, acero M3 enfriado en N₂, acero M2 con revenido, acero M3 con revenido

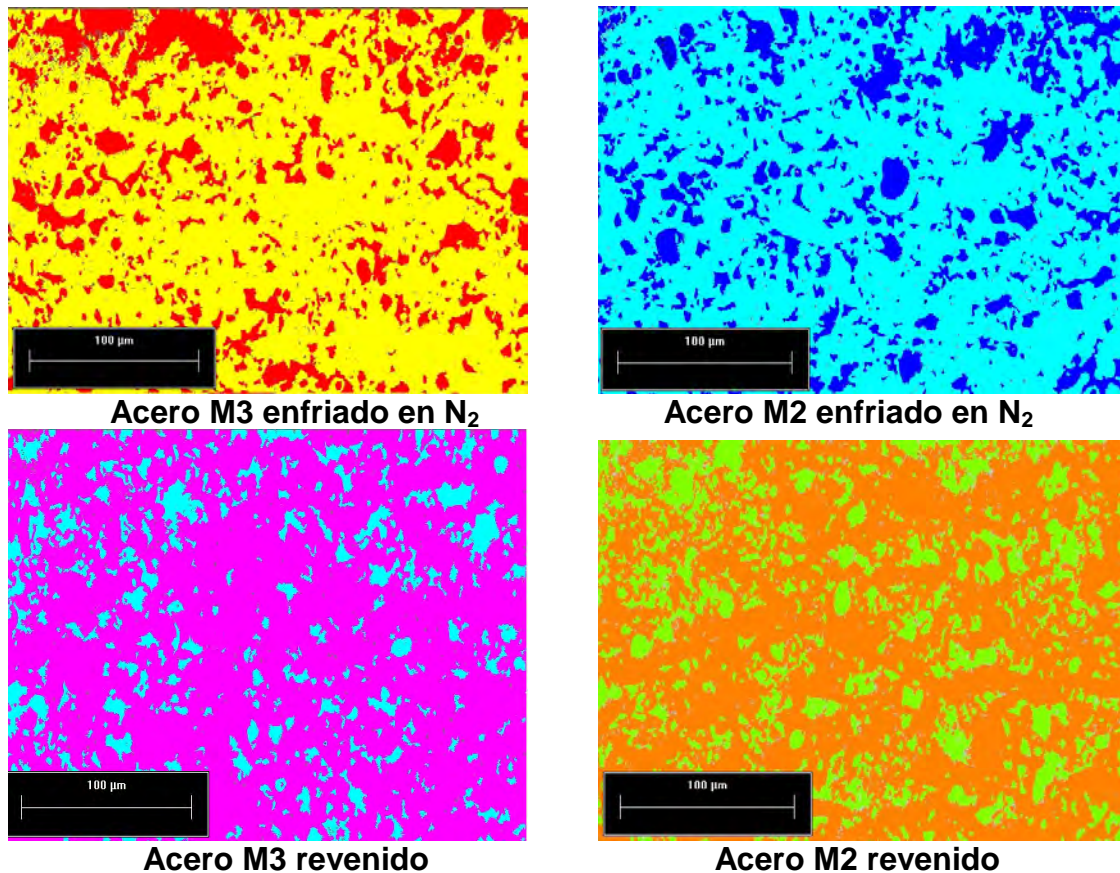


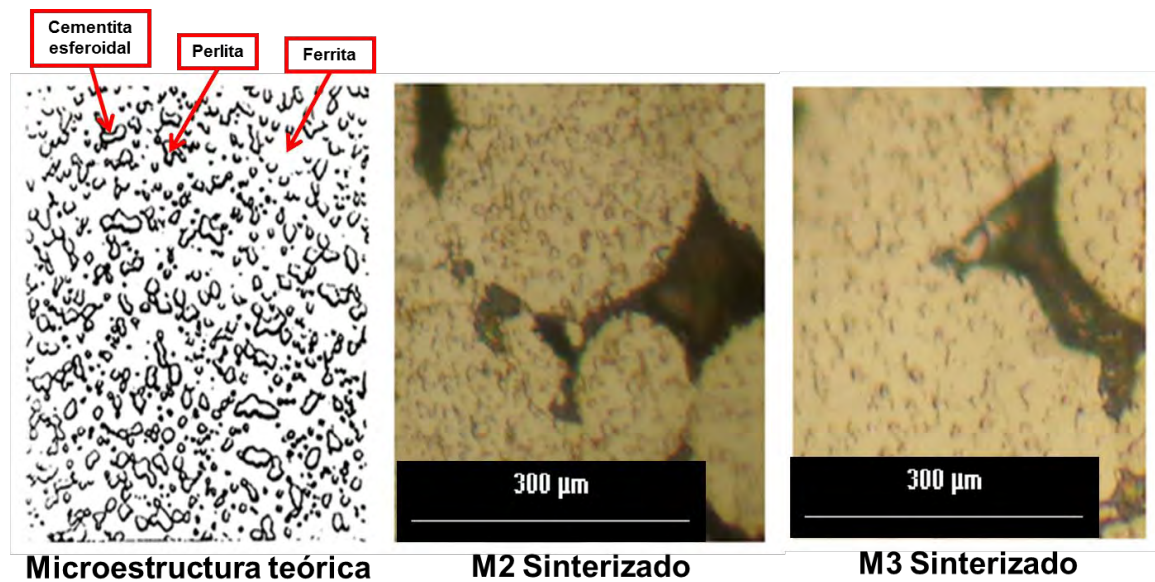
Tabla 7. Porcentaje de poros del material de los asientos

Material	% de poros
Aleación de acero	1,2
M2 sinterizado	11,5
M3 sinterizado	6,9
M2 con enfriamiento en N ₂	24,3
M3 con enfriamiento en N ₂	23,1
M2 con revenido	17,4
M3 con revenido	25,3

En las figuras 10 y 11 se observa que los poros se presentan de forma alargada, con mayor tiempo de sinterización, logrando que las puntas de los poros desaparezcan y redondeen, lo que permite mejor resistencia del material debido a que se reducen concentradores de esfuerzos, lo cual reduce la probabilidad de inicio de nucleación de grietas.

Reportes de análisis de la empresa proveedora del material en polvo identificaron estructuras perlíticas que se alternan en láminas de ferrita blanda con láminas de cementita de alta dureza. Se observó que bajo la influencia de tensiones cortantes se produce deformación plástica prácticamente solo en las láminas de ferrita donde las dislocaciones pueden moverse con relativa facilidad. Cuanto más finas son las láminas de ferrita, más restringido es el movimiento de las dislocaciones debido a la rigidez de las láminas de ferrita. Esto explica por qué la ductilidad de la perlita aumenta y su correspondiente dureza disminuye al incrementarse el espesor de las láminas de ferrita⁹.

Figura 14. Microestructuras Esferoidal, Acero pulvimetalúrgico M2, Acero pulvimetalúrgico M3



⁹ Manual Höganäs para componentes sinterizados, Empresa Höganäs PM-school, Manual 1: Propiedades de los materiales.

Por medio de un tratamiento térmico de recocido durante dos horas, las láminas de cementita pueden esferoidizarse, por lo tanto mejoran las propiedades mecánicas del material. En la perlita resultante, también llamada esferoidita, pequeñas partículas esféricas de cementita están embebidas en una matriz ferrítica.

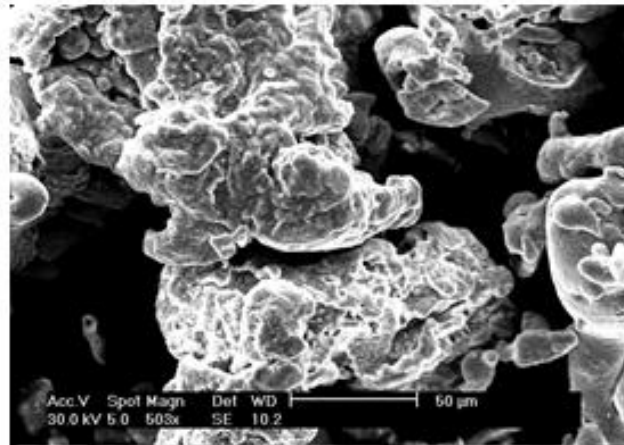
La esferoidita es la variedad de perlita más dúctil, porque en su matriz ferrítica las dislocaciones pueden moverse con mayor libertad, restringidas a un grado menor por las inclusiones de cementita esférica¹⁰, por ende en las piezas que presentan esta fase, su dureza disminuye y su ductilidad aumenta, en comparación con otras del mismo material sin tratamiento de revenido, en la figura 14 se observa la comparación de las microestructuras obtenidas de los aceros M2 y M3, en contraste con la microestructura esferoidal⁹.

7.4.MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, SEM

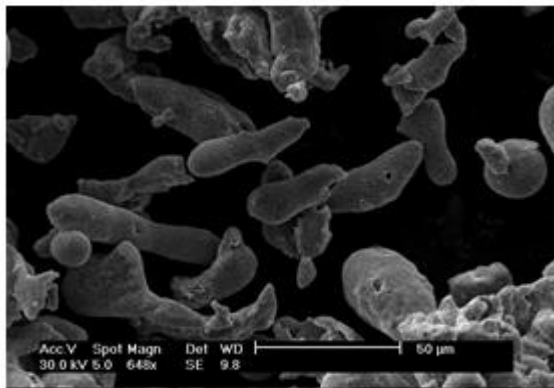
Al material en polvo de aleación de acero, acero M2 y acero M3 y a los asientos de válvulas se les realizó microscopía electrónica de barrido, utilizando un equipo Philips modelo XL30 ESEM TMP del Laboratorio de Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. En las micrografías de la figura 15 se observa que las partículas del acero M2 y de la aleación de acero son amorfas, además poseen diferente tamaño de grano que van desde 5 a 220 μm , con este resultado se puede sugerir que estos materiales tienen bajo nivel de compresibilidad; mientras que en el acero M3 los granos son alargados y su tamaño de las partículas varía entre 5 a 50 μm , la diferencia no es tan grande como la de los aceros M2 y la aleación de acero, lo que lleva a suponer que este material presenta nivel de compresibilidad mayor, logrando porosidades menores, disminuyendo el coeficiente de fricción, y por ende la disminución de pérdida de material.

¹⁰ Manual Höganäs para componentes sinterizados, Empresa Höganäs PM-school, Manual 1: Propiedades de los materiales.

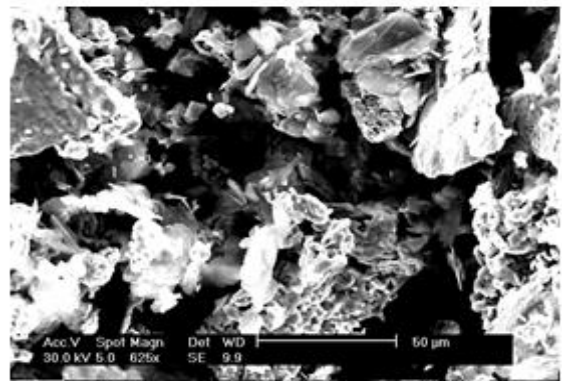
Figura 15. Micrografías SEM; a. Polvo de Acero M2, b. Polvo de Acero M3, c. Polvo de aleación de acero



Aleación de acero



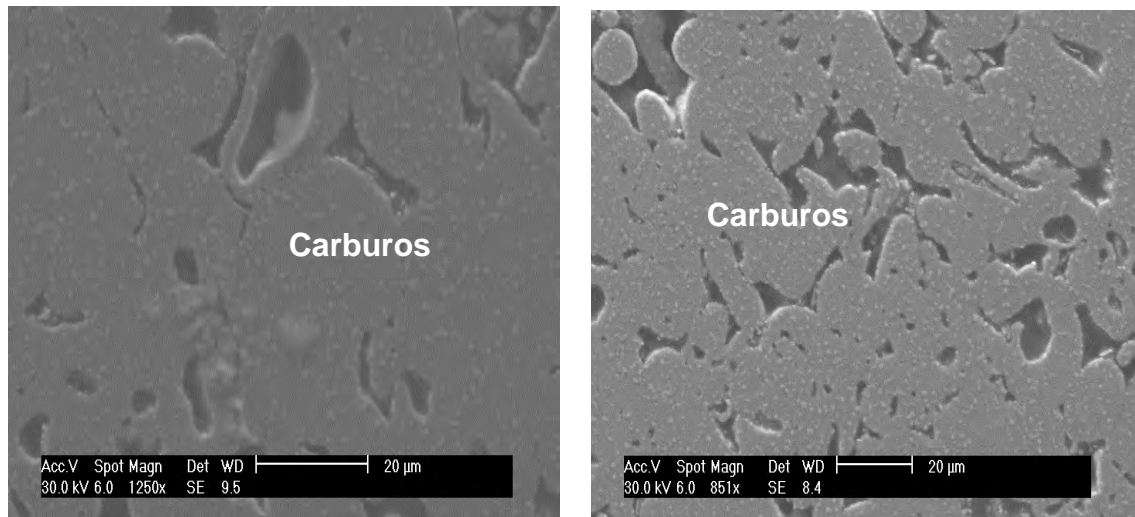
Acero M3 sinterizado



Acero M2 sinterizado

Después de realizar al material en polvo, la compactación, la sinterización y los tratamientos térmicos a los asientos les realizamos microscopia SEM. Debido al alto porcentaje de vanadio, molibdeno y tungsteno, se forman carburos en la microestructura de los materiales M2 y M3 como se aprecian en las micrografías de la figura 16.

Figura 16. Micrografías SEM de asientos de válvulas

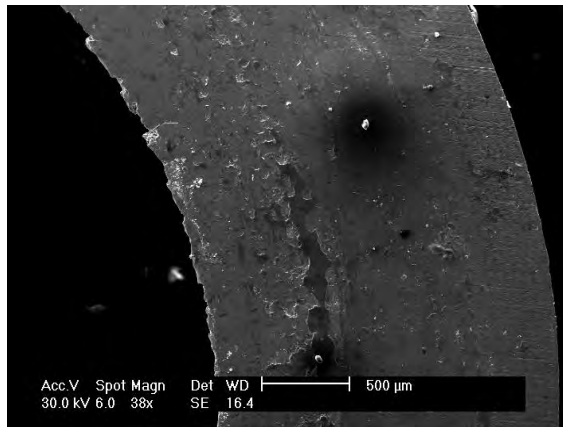


M2 sinterizado

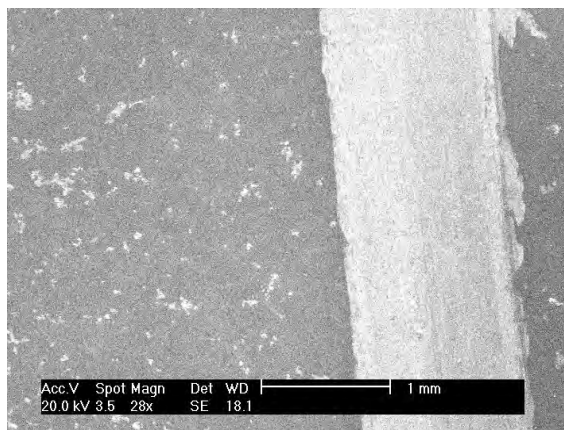
M3 sinterizado

También se realizaron micrografías SEM, para analizar las pistas de desgaste en los asientos de válvulas, en las figuras 17 y 18 se observan las huellas dejadas por el pin sobre cada uno de los asientos; para el acero M2 y M3 se observa bajo desprendimiento de material por microsoldadura, mientras para la aleación de acero se observa, alto desprendimiento del material por microsoldaduras, esto se evidencia por la pérdida de material que presentaron en la prueba de pin on disk.

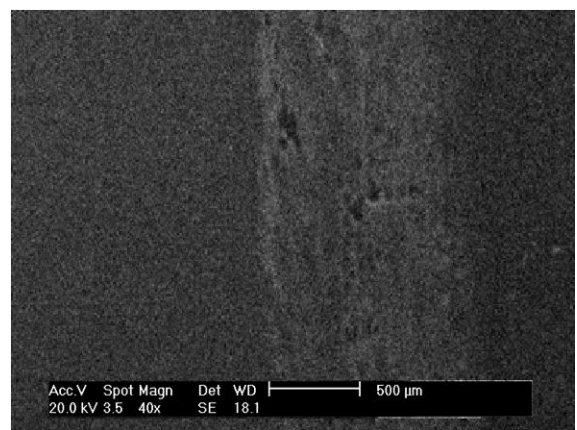
Figura 17. Micrografías SEM; Aleación de acero, Acero M2 sinterizado, Acero M3 sinterizado



Aleación de acero

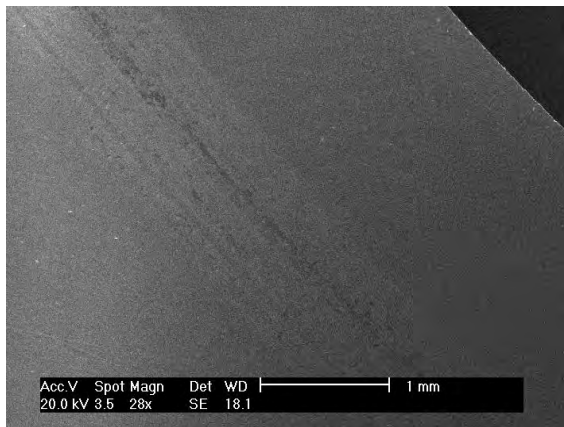


Acero M3 sinterizado

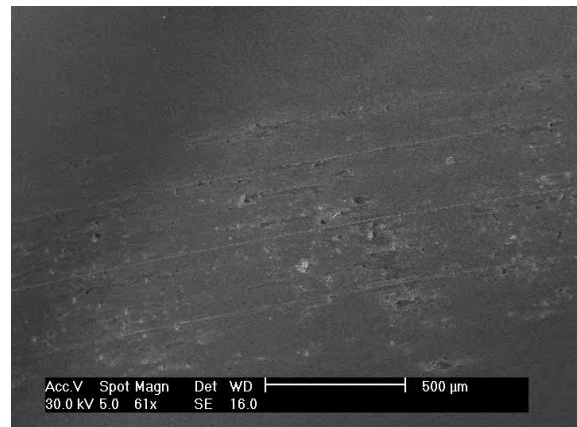


Acero M2 sinterizado

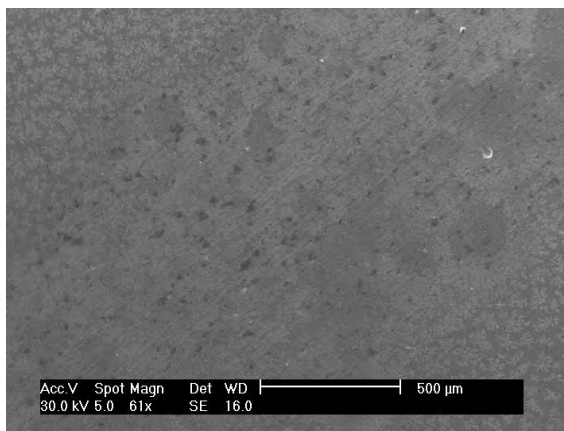
Figura 18. Micrografías SEM; Acero M2 enfriado en N₂, Acero M3 enfriado en N₂, Acero M2 con revenido, Acero M3 con revenido



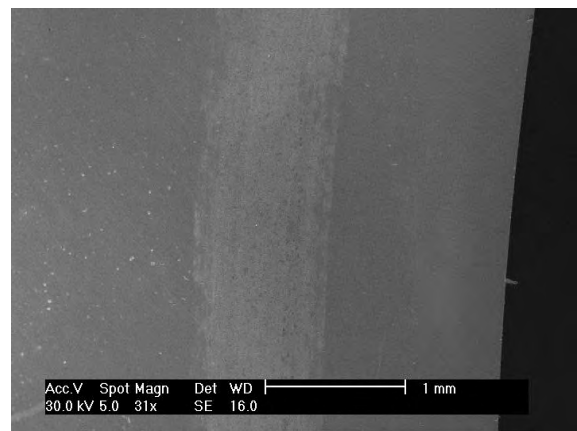
Acero M3 enfriado en N₂



Acero M2 enfriado en N₂



Acero M3 con revenido



Acero M2 con revenido

7.5. PRUEBA DE ESTABILIDAD DIMENSIONAL

Para la prueba de estabilidad dimensional se realizó calentamiento en un horno para tratamientos térmicos a las probetas de acero pulvimetalúrgico M2 Y M3, a diferentes temperaturas, dejando enfriar dentro de este, después de un sostenimiento de la temperatura de media hora, venciendo la fuerza que le daba el ajuste de 4 milésimas de pulgada entre el asiento y la matriz, para comprobar que los asientos de válvulas para motores no se contraían lo suficiente para salir de la matriz. Se midieron los diámetros exteriores inicial, final y después de la

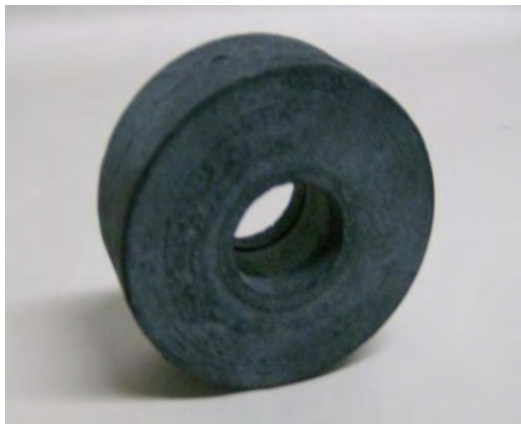
limpieza de los asientos de válvulas. En la figura 19 se muestra las piezas dentro del horno.

Figura 19. Asiento de válvula en tratamiento térmico



En los anexos H e i, se observa el diámetro exterior inicial, final y después de la limpieza de los asientos, donde se observa que los diámetros de los asientos no presentaron variación significativa. La figura 20 presenta el asiento después de la simulación en el horno para determinar la estabilidad dimensional.

Figura 20. Asientos después del tratamiento térmico



El asiento fabricado en acero M2, se observó que estaba muy ajustado, y por lo tanto se fragmentó en 4 partes, como se presenta en la figura 21. Para los demás asientos pulvimetalúrgico también se observó que estaban bien ajustados, pero estos no presentaron fracturas debido a que su extracción se hizo mediante prensa hidráulica. En la grafico 4 se observa las diferencias de estabilidad dimensional para cada material y la desviación estándar para cada material.

Grafico 4. Diámetro exterior Vs tipo de material para prueba de estabilidad dimensional

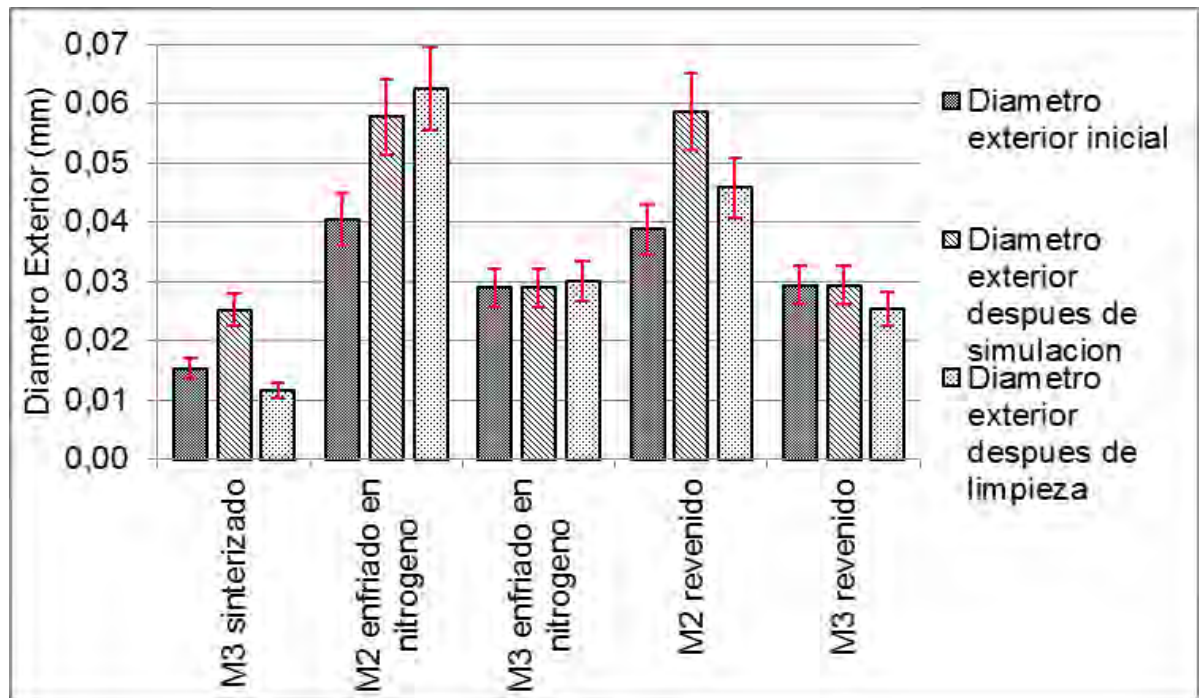


Figura 21. Asientos después de la extracción. a. Asiento de acero M2 sinterizado, b. Asiento de acero M3 sinterizado



En la tabla 8 se presentan los resultados de cada uno de los asientos a diferentes temperaturas, se identifica con la palabra Si, los asientos que conservaron su estabilidad dimensional, mostrando que todos los asientos presentaron dificultad para extraerlos, por lo tanto se requirió utilizar prensa hidráulica.

Tabla 8. Extracción de la probeta a alta temperatura

	T₁ 700°C	T₂ 800°C	T₃ 900°C	T₄ 1000°C
M2	Si	Si	Si	Si
M3	Si	Si	Si	Si

Los resultados anteriores muestran que ninguno de los asientos perdió su estabilidad dimensional, dato que es muy importante para la empresa MVM fabricante de estos asientos, ya que los pueden comercializar con la confianza y que no se presentará la salida del asiento al bajar la temperatura del motor como estaba sucediendo anteriormente, produciendo daños en el motor al volver a iniciar su funcionamiento.

8. CONCLUSIONES

Dureza: Presentó mayor dureza HRC el acero M3 sinterizado, debido a que los elementos de aleación tienen mayor porcentaje que los otros materiales. En dureza Vickers los valores de M3 y M2 sinterizados fueron similares, debido a que la micro estructura es similar.

Desgaste: Presentó menor desgaste el acero M3 sinterizado, debido a la presencia de carburos en su microestructura y su coeficiente de fricción fue menor que el de los otros materiales.

Estabilidad dimensional: los aceros M3 y M2 en todos sus estados presentaron dilatación en su diámetro exterior, porque sus elementos de aleación son superiores al acero aleado, y probablemente el coeficiente de dilatación térmica es mayor que el del acero aleado.

De acuerdo a los resultados obtenidos en cada una de las pruebas que se realizaron a los materiales pulvimetalúrgicos M2, M3 y acero aleado, se puede decir que el acero M3 sinterizado, cumple con todas las exigencias requeridas para fabricar los asientos de válvula para motores Diésel.

Los aceros M2 sinterizado y M2 enfriado con N_2 , presentaron propiedades cercanas al acero M3 sinterizado y presentaron dilatación en su diámetro exterior, pero en el caso del acero enfriado con N_2 requiere este tratamiento adicional, lo cual incrementa los costos de producción.

De acuerdo a los resultados de esta investigación sugerimos a la empresa MVM utilizar el acero M2 y M3 para la fabricación de sus asientos de válvula para motores Diesel; para incrementar su competitividad, mediante la innovación en sus procesos y reemplazar las piezas que producían por proceso de fundición, por proceso pulvimetalúrgico.

9. RECOMENDACIONES

Estudiar los efectos de la presión en los procesos de compactación y sinterización, para disminuir la presencia de poros e incrementar el ancho del cuello que se forma al unirse los granos, esto mejorará las propiedades del material y disminuirá coeficiente de fricción. Analizar los efectos de maquinabilidad en los asientos de válvulas en todos sus estados de suministro. Este trabajo se realizará dentro del proyecto macro de investigación, que se presentará al final del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

ALBA DE SANCHEZ, Nelly; CAÑIZALES, Juan Pablo y SÁNCHEZ STHEPA, Héctor. Mecanosítesis de carburo de titanio. Proyecto de investigación profesoral. Santiago de Cali. Universidad Autónoma de Occidente, Universidad del Valle. Facultad de ingenierías, 2004. 10-11p.

ALIBABA [en línea]: motor diésel asiento de la válvula. 2013, [consultado el 25 de noviembre de 2013]. Disponible en internet: http://spanish.alibaba.com/trade/search?selectedTab=product&csrf_token=cqvqgoubilh&SearchText=motor+diesel+asiento+de+la+v%C3%A1lvula

ASKELAND, Donald .R. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3 ed. Mexico: International Thomson Editores, 1998. 778 p.

BOETTINGER W, Perepezko JH. In: Liebermann HH, editor. Rapidly solidified alloys: processes, structures, properties, applications. New York, NY: Marcel-Dekker, 1993. p. 17±78.

CALLISTER, D. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Vol 2. Mexico: Editorial Reverté S.A. 1996. 721p.

COLLIEU A, Powney D. Propiedades Mecánicas y Térmicas de los Materiales. Mexico: Reverte S.A. 1977. 317p.

ERMAKOV S.S. y VYAZNIKOV N.F. Aceros y piezas pulvimetalúrgicos. Leningrado: Mashinostrieniye, 1990. 319 p.

HUME-ROTHERY, W; RAYNOR, GV. The structure of metals and alloys. London: Institute of Metals, 1962.

HÖGANÄS, Manual Höganäs para componentes sinterizados, Empresa Höganäs PM-school, Manual 1: Propiedades de los materiales.

IVENSEN, V. A., Densification of metal powders during sintering. Michigan: Ed. Consultants Bureau, 1973. 242 p.

JARAMILLO SUAREZ, Héctor Enrique; ALBA DE SANCHEZ, Nelly y AVILA, Julián Arnaldo. Fundamentos y aspectos generales del Aleamiento Mecánico. Santiago de Cali 2011. Universidad Autónoma de Occidente. Grupo de Investigación en Ciencia e Ingeniería de los Materiales GCIM.

MALISHEV, A.I; NIKOLAIEV, G.N. y SHUVALOV, Y.A. Tecnología de los Metales. Moscú: Mir, 1975. 432 p.

PALMA, Rodrigo et al. Nuevos métodos de fabricación mediante tecnologías de polvos [en línea]. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 1999 [citado en 01 Julio de 2006]. Disponible en internet: http://cabierta.uchile.cl/revista/12/articulos/12_6/index.html.

[PARTES Para MOTOR Y PIEZAS SINTERIZADAS](http://www.mvmltda.com/es/piezas_sinterizadas.html) [en línea]. Santiago de Cali: MVM LTDA, 2011 [consultado 15 de noviembre del 2013]. Disponible en internet: http://www.mvmltda.com/es/piezas_sinterizadas.html

RINCON, Anderson; Cruz Beatriz .Comportamiento estructural y magnético del sistema FECO obtenido mediante aleamiento mecánico. Universidad Tecnológica de Pereira. Diciembre de 2012. Scientia et Technica Año XVII, No 52. ISSN 0122-1701.

SÁNCHEZ STHEPA, Héctor. Síntesis y caracterización de nuevos materiales utilizando tecnologías de polvos. Proyecto de investigación. Colciencias, 2003.

SURYANARAYANA, C; KOCH, CC. Non-equilibrium processing of materials. Oxford: Pergamon, 1999. 438 p.

ANEXOS

Anexo A. Datos de Dureza Vickers de asientos en material M2

Indentación	Medición	Diagonal 1 (μ)	Diagonal 2 (μ)	Dureza (HVN)
1	1	40,5	39,6	579
	2	39,6	40,6	577
	3	39,2	38,5	616
	Promedio	-	-	591
2	1	38,7	36,7	652
	2	38,8	37,1	645
	3	38,5	37,1	649
	Promedio	-	-	649
3	1	40,9	40,4	562
	2	39,9	40,6	574
	3	40,2	40,1	577
	Promedio	-	-	571
4	1	41,5	41,1	544
	2	41,1	41,9	538
	3	41,5	41,9	533
	Promedio	-	-	538
5	1	47,2	48,9	402
	2	47,6	47,4	411
	3	47,3	46,9	418
	Promedio	-	-	410
Promedio Total		-	-	552

Anexo B. Datos de dureza Vickers de asientos en material M3

Indentación	Medición	Diagonal 1 (μ)	Diagonal 2 (μ)	Dureza (HVN)
1	1	42	41,2	536
	2	43	44,4	481
	3	43,4	43,8	488
	Promedio	-	-	502
2	1	42,3	40,7	538
	2	43,4	41,6	513
	3	43,5	40,9	521
	Promedio	-	-	524
3	1	38,4	42,5	568
	2	37,6	36	685
	3	37,2	35,5	704
	Promedio	-	-	652
4	1	40,5	41,5	552
	2	40,5	40,9	560
	3	40,5	42	546
	Promedio	-	-	553
5	1	40,3	39,7	579
	2	40,6	39,9	574
	3	39,5	39,8	591
	Promedio	-	-	581
Promedio Total		-	-	562

Anexo C. Datos de Dureza Vickers de asientos en material de acero aleado

Indentación	Medición	Diagonal 1 (μ)	Diagonal 2 (μ)	Dureza (HVN)
1	1	58,2	58,5	272
	2	57,7	58,5	275
	3	58	59	271
	Promedio	-	-	273
2	1	58,4	57,7	276
	2	58,1	58,3	274
	3	58,1	58	276
	Promedio	-	-	275
3	1	55,5	54,9	304
	2	56,5	55,5	296
	3	56,1	55,2	300
	Promedio	-	-	300
4	1	49,3	47,1	399
	2	49,2	46,9	402
	3	49,9	47,6	391
	Promedio	-	-	397
5	1	45,8	45,5	446
	2	45,6	46,3	440
	3	45,4	45,5	450
	Promedio	-	-	445
Promedio Total		-	-	338

Anexo D. Datos de dureza Vickers de asientos en material M2 enfriado en N2

Indentación	Medición	Diagonal 1 (μ)	Diagonal 2 (μ)	Dureza (HVN)
1	1	39,6	38,5	610
	2	39,2	38,2	619
	3	39,5	38,5	616
	Promedio	-	-	615
2	1	35,3	35,4	744
	2	34,8	35,4	753
	3	35,1	34,9	757
	Promedio	-	-	751
3	1	35,4	44,4	784
	2	34,7	33,1	807
	3	35,5	32,1	812
	Promedio	-	-	801
4	1	39,3	39,1	603
	2	39,2	39,1	606
	3	39,4	39,1	603
	Promedio	-	-	604
5	1	38,6	38,6	632
	2	37,6	37,9	652
	3	38,2	37,7	645
	Promedio	-	-	643
Promedio Total		-	-	683

Anexo E. Datos de dureza Vickers de asientos en material M3 enfriado en N2

Indentación	Medición	Diagonal 1 (μ)	Diagonal 2 (μ)	Dureza (HVN)
1	1	46,8	46,8	423
	2	46,9	46,5	425
	3	46,5	46,7	427
	Promedio	-	-	425
2	1	37,7	36,2	681
	2	37,2	36,1	692
	3	37	36,6	685
	Promedio	-	-	686
3	1	34,5	34	793
	2	34,9	34	784
	3	34,6	33,8	793
	Promedio	-	-	790
4	1	36,2	36	711
	2	35,9	35,6	727
	3	35,8	36	719
	Promedio	-	-	719
5	1	38,6	38,3	629
	2	38,4	38,7	626
	3	38,4	38,6	626
	Promedio	-	-	627
Promedio Total		-	-	649

Anexo F. Datos de dureza Vickers de asientos en material M2 con revenido

Indentación	Medición	Diagonal 1 (μ)	Diagonal 2 (μ)	Dureza (HVN)
1	1	48,9	48,9	388
	2	48,7	48,7	391
	3	48,9	48,5	391
	Promedio	-	-	390
2	1	38,7	38,1	629
	2	38,1	38,4	635
	3	38,1	38,8	629
	Promedio	-	-	631
3	1	39,3	39	606
	2	39,2	39,1	606
	3	39,5	39,4	597
	Promedio	-	-	603
4	1	38,2	38,5	632
	2	38,2	38	639
	3	38,4	38,7	626
	Promedio	-	-	632
5	1	49,8	48,3	386
	2	49,1	48,9	386
	3	49,2	48,9	386
	Promedio	-	-	386
Promedio Total		-	-	528

Anexo G. Datos de dureza Vickers de asientos en material M3 con revenido

Indentación	Medición	Diagonal 1 (μ)	Diagonal 2 (μ)	Dureza (HVN)
1	1	51,3	52,3	346
	2	51,3	52	348
	3	51,1	52,4	347
	Promedio	-	-	347
2	1	41,8	39,5	562
	2	41,2	39,9	565
	3	41,1	39,6	571
	Promedio	-	-	566
3	1	44,5	44,9	464
	2	44,4	44,4	470
	3	44,4	44,7	468
	Promedio	-	-	467
4	1	43,8	45,4	466
	2	43,5	45,5	468
	3	44	45,2	466
	Promedio	-	-	467
5	1	34,3	34,1	793
	2	34,1	34,3	793
	3	34,4	34,1	793
	Promedio	-	-	793
Promedio Total		-	-	528

Anexo H. Datos de dimensiones de las probetas 1

	Diámetro exterior inicial	Diámetro exterior después de simulación	Diámetro exterior después de limpieza
acero M3 sinterizado			
M3-1	50,46	50,53	50,48
M3-2	50,43	50,5	50,48
M3-3	50,45	50,48	50,5
promedio	50,45	50,50	50,49
Desviación estándar	0,02	0,03	0,01
Error estándar	0,0017	0,0028	0,0013
acero M2 enfriado en nitrógeno			
M2-1	50,45	50,50	50,47
M2-2	50,53	50,60	50,59
M2-3	50,50	50,50	50,50
promedio	50,49	50,53	50,52
Desviación estándar	0,04	0,06	0,06
Error estándar	0,0045	0,0064	0,0069
acero M3 enfriado en nitrógeno			
M3-1	50,85	50,85	50,80
M3-2	50,90	50,90	50,86
M3-3	50,85	50,90	50,83
promedio	50,87	50,88	50,83
Desviación estándar	0,03	0,03	0,03
Error estándar	0,0032	0,0032	0,0033

Anexo I. Datos de dimensiones de las probetas 2

	Diámetro exterior inicial	Diámetro exterior después de simulación	Diámetro exterior después de limpieza
acero M2 revenido			
M2-1	50,80	50,85	50,83
M2-2	50,88	50,95	50,91
M2-3	50,85	50,85	50,85
Promedio	50,84	50,88	50,86
Desviación estándar	0,04	0,06	0,05
Error estándar	0,0043	0,0065	0,0051
acero M3 revenido			
M3-1	50,85	50,85	50,85
M3-2	50,90	50,90	50,90
M3-3	50,85	50,90	50,88
Promedio	50,87	50,88	50,88
Desviación estándar	0,03	0,03	0,03
Error estándar	0,0033	0,0033	0,0028